

农业生态系统的 水-热状况和 产量的数学模拟

〔苏〕О.Д.Сиротенко



气象出版社

农业生态系统的水-热状况和 产量的数学模拟

〔苏〕 О. Д. 西罗坚科 著

裘碧梧 译
董 钻 校

气 象 出 版 社

内 容 简 介

本书用生态系统的观点,研究了土壤-作物-大气系统的数学模拟问题,介绍了制定模拟模式的一般原则和实际经验。主要包括:农业气象学中数学模拟的一般问题、产量计算是数学物理学问题、土壤-作物-大气系统的水热动力学、农业群落生长的简化理论模式、农业气象学中的统计模式和物理-统计模式、作物产量形成的动力模式及“天气-产量”的动力-统计模式等七个部分。

本书可供农业气象、农业、作物栽培、作物生理、土壤等学科的科技工作者以及有关大专院校师生参考。

О. Д. Сиротенко

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДНОТЕПЛОВОГО РЕЖИМА И ПРОДУКТИВНОСТИ АГРОЭКОСИСТЕМ

Ленинград Гидрометеиздат

1 9 8 1

农业生态系统的水-热状况和 产量的数学模拟

〔苏〕 О. Д. 西罗坚科

裘碧梧 译

董 钻 校

责任编辑 张国秀

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行 全国各地新华书店经售

*

开本: 787 × 1092 1/32 印张: 6.25 字数: 132千字

1985年4月第一版 1985年4月第一次印刷

印数: 1 — 5,000

统一书号: 13194.0205 定价: 1.30元

译 者 的 话

这部《农业生态系统的水-热状况和产量的数学模拟》是讨论作物群落中能量转化和物质交换、作物生理过程和产量形成的数学模拟问题的专著。作者把土壤-作物-大气系统当作数学模拟的对象，把作物群落产量的计算当作生物地球物理学问题，提出了农业群落的简化理论模式、农业气象学中的统计模式和物理-统计模式、作物产量形成的动力模式等。

作者还根据迄今已有的文献资料和自己的研究成果制定了“天气-产量”的动力-统计模式。这个模式是比较全面的，也是值得借鉴的。当然，作物生产过程的数学模拟问题极其复杂而又困难，任何一个模式也不可能完全描述千变万化的作物、大气、土壤状况，任何一个模式都有其严格的针对性，但是模拟的系统思路和基本程序均有一定的参考意义。

这部专著为我们提供了制定模拟模式的理论原则和实际经验。对于正在从事作物生理过程指标化和栽培措施规范化研究的我国作物生理、作物栽培、土壤农化，特别是农业气象方面的科技工作者、大专院校师生来说，本书具有参考价值。

主 要 符 号

$P\Pi$	植被
$\Pi\Pi P$	作物的生产过程
$\Phi A P$	光合有效辐射
ΠB	最大持水量
$H\Pi B$	田间最小持水量
B_3	凋萎湿度
H	植被高度
H_1	给定的外界气象条件的高度
Π	根系分布的下界
Π_1	用以计算的土层的下界
z	垂直坐标
ρ	空气密度
c_p	空气热容量
λ	汽化热
σ	斯蒂芬-波尔兹曼 (Stefan-Boltzman) 常数
L	植被植物量的相对面积——叶面积指数 (厘米 ² · 厘米 ⁻²)
S	植物量表面的比密 (厘米 ² · 厘米 ⁻³)
C_{ex_i}	环境中 i 号物质的浓度
C_{in_i}	植物组织中 i 号物质的浓度
K_{ex_i}	环境中 i 号物质的交换系数
K_{in_i}	植物组织中 i 号物质的交换系数
T_l	植物量的温度
T	空气温度

q	空气比湿
q_l	在温度 T_l 条件下空气的饱和湿度
ψ_l	叶片的水势
ψ_s	土壤中的水势
k	湍流交换系数
U	风速
l	混合长度
$I \uparrow, I \downarrow$	向上和向下的短波辐射通量
$F \uparrow, F \downarrow$	向上和向下的长波辐射通量
E_A	大气逆辐射
TR	植被的蒸腾
E	作物冠层下土壤的蒸发
v	空气相对湿度
d	日平均空气饱和差
R, R_{ϕ}	降水总量和有效降水总量
W_i	土壤 i 层的贮水量
Φ	农业群落一日内的光合强度
α	光合作用光曲线初始斜率
r_a	叶面附近空气的扩散阻力 (秒·厘米 ⁻¹)
r_{st}	气孔的扩散阻力 (秒·厘米 ⁻¹)
r_m	叶肉的扩散阻力 (秒·厘米 ⁻¹)
r_c	化学阻力 (秒·厘米 ⁻¹)
m_l	农业群落的叶片干重 (毫克·厘米 ⁻²)
m_s	农业群落的茎秆干重 (毫克·厘米 ⁻²)
m_r	农业群落的根系干重 (毫克·厘米 ⁻²)
m_R	繁殖器官干重 (毫克·厘米 ⁻²)
M	农业群落的总干重 (毫克·厘米 ⁻²)

R_0	维持呼吸系数 (毫米·毫克 ⁻¹ ·日 ⁻¹)
R_R	生长呼吸系数
α_p^i	叶片、茎秆、根系和繁殖器官同化物的分配函数 ($p \in l, s, r, R$)
λ_p^i	叶片、茎秆和根系同化物的再分配函数, 相应为 ($p \in l, s, r$)
δ_r^i	越冬作物春季返青的函数
γ_p^i	叶片、茎秆和繁殖器官的植物量变黄的函数, 相应为 ($p \in l, s, R$)
β_p	叶片、茎秆、穗子植物量的重量比密 (厘米 ² ·毫克 ⁻¹) 系数, 相应为 ($p \in l, s, R$)
ω	有效温度的现时总和
ψ_T	光合作用的温度系数
φ_T	呼吸的温度系数
τ	日长
μ_i	i 层土层中根的植物量与根系总植物量之比
Π	一日内的日照时数 (小时)

编 者 的 序

向读者推荐的О. Д. 西罗坚科(О. Д. Сиротенко)的专著《农业生态系统的水-热状况和产量的数学模拟》是讨论土壤-作物-大气系统中能量和物质交换的数值理论、作物生产过程中的数学模拟和群体产量形成的一套丛书中的第五本。

在Ю. К. 罗斯(Ю. К. Росс)的《植被的辐射状况和结构》(1975年)一书中,把群体的辐射状况和结构看作生产过程中密切相关的因子。С. В. 涅尔平和А. Ф. 邱德诺夫斯基(С. В. Нерпини А. Ф. Чудновский)的《作物-土壤-空气系统中的能量和物质交换》(1975年)一书中,则注重于能量和物质交换一般数量观点的建立,和对土壤过程的论述。Х. Г. 托明格(Х. Г. Тооминг)的著作《太阳辐射与产量形成》(1977年)可以作为Ю. К. 罗斯专著合乎逻辑的续篇。它所讨论的是,在产量形成的各个阶段,群体对太阳辐射利用的数量评价。在З. Н. 比赫列(З. Н. Бихеле)、Х. А. 莫尔达乌(Х. А. Молдау)和Ю. К. 罗斯的《缺水条件下作物蒸腾作用和光合作用的数学模拟》(1980年)一书中,概述了作物生产过程数学模拟的现状,并引证了数值实验的结果。这些实验是根据作者为评价水文气象因子和农业物理因子,对各种作物蒸腾作用和光合作用的影响而制定的模式完成的。

О. Д. 西罗坚科的专著是前几本书的续篇,讨论的是“天气-产量”综合动力模式的制定和运用。本书作者在苏联

是作物植株生产过程和群体产量形成数学模拟方面的权威专家。在专著中叙述并讨论了他领导的集体，十余年来积极工作的结果。在世界文献中首次明确地提出应把产量计算问题，当作生物地球物理学课题中的数学问题，和把土壤-作物-大气系统的一般特性当作模拟的对象。进而，作者还根据系统的观点和福雷斯捷尔 (ДЖ. Форрестер) 所提出的各种符号，阐述了建立模式的合乎逻辑的提纲，模式的各个组的数量结构；详细论述了他们所制定的苏联最好的、世界上最全面的模式之一——谷类作物“天气-产量”动力模式。

作者注意到获得计算用原始数据的现实可能性，在模式参数化的艰难道路上完成了大量的和有成效的工作。书中所介绍的材料表明，“天气-产量”动力模式看来已经达到了在最近的将来即可广泛实际运用的发展水平。

数学物理学博士 Ю. К. 罗斯

引 言

本书是专门讨论水文气象环境条件对作物产量影响过程的数学描述方法的。原来大概只有某些农业气象学家才关心的这一课题的研究，近年来已大为发展。业已形成了在这一领域积极工作的包括数学家以及大气物理、流体动力学、植物生物物理、土壤改良等方面专家在内的许多新的科学集体。“环境-作物”系统的研究越来越具有综合性且带有边缘学科的性质。

对农业气象学以及对整个生态学更加关注的根源在哪里呢？科学技术发展深入人心的成就，在某个时候曾造成了人可以完全脱离自然，其中包括水文气象条件的错觉。近来，这种概念正在被一种认识所代替，即技术发展非但不能使人脱离对自然条件的注意；相反，却要求人们必须越来越全面和细致地注意，生物圈对这种或那种作用所可能做出的反应。

至于谈到农业，则越来越明显的是，为了保持已有的产量增长速度，单纯地使无机肥料和水分状况适宜化已嫌不足，而必须控制作物生活的所有综合因素。在作物栽培的自控系统和进行产量规划时，基本问题正是这样提出的。为了解决这一问题，需要具有关于作物与周围环境相互关系的新知识。

在近二十年中，这一领域内知识的范围和性质已经发生了很大的变化。业已提出了作物重要生活过程（光合作用、呼吸作用、生长、无机营养）的模式。作物生活环境——近地面空气层和土壤中能量交换和物质交换过程的研究前进了

一大步。这些新的知识以产量形成动力模式的形式综合起来。运用这些模式通过电子计算机可以计算出，在任何给定的土壤和天气条件下，作物整个生育期内生长的详细情况。

关于“环境-作物”系统知识的现有水平，数学物理学方法的广泛应用，为对水文气象环境条件与作物生产力之间关系的研究和阐述，过渡到新的阶段创造了先决条件。解决农业气象学的这一中心问题，可分如下三个阶段。

第一阶段是定性描述。为了科学地说明天气条件与作物生活之间的关系，引入了农学、植物生理学的原理，以及对近地面气层和土壤水-热交换过程进行物理分析的定性结果。

在第二阶段，主要注意力放在探索“天气-产量”系统中输入和输出间的直接经验关系上。已经找到了具有很大实践意义的许多相关关系。苏联农业气象工作者在战后对这些研究的发展做出了很大贡献。现行农业生产的农业气象保证系统，基本上是利用这些工作所揭示的相互关系建立起来的。

门司和佐伯、戴·维特(Monsi、Saeki、De Wit)、布德科(Будыко)、罗斯等人详细制定的植被光合作用静态模式，乃是过渡到第三阶段的先决条件。起初曾形成了这样的印象，似乎这些抽象的理论与农业气象学的迫切任务相距甚远。然而，由最初的植被光合作用静态模式，过渡到成熟的、解决农业气象学任务的动力模式，花了不到十年功夫。

研究上述问题的第三阶段可以称作动力学阶段。它是以群体(农业群落)这一动态光合作用系统为基础的，这一系统的过程决定于同周围环境的能量交换和物质交换过程。

这一观念，从某种程度上说，又使我们回到第一阶段所特有的概念上去了。不过是在新的定量的——能量交换和物质交换的现代理论基础之上回到这一概念的。同时，新的方

法是与前一阶段——农业气象学分析方法发展统计学阶段密切相连的。首先，象回归方程的参数一样，产量形成的动力模式所应用的参数也是由同样的数学统计资料确定的。其次，许多回归方程和别的经验相关关系都不可避免的包括在动力模式之中。

上述新观点不能掩盖事物的继承性。这一点非常重要，因为动力-统计模式的实际应用还刚刚开始。有理由指望，为农业生产提供农业气象保证的新的自动化系统（动力模式是其中心环节）将是相当有效的。然而，动力模式的可能性，正如与应用其他有关模式的局限性一样，研究得还不够充分。为了完善这些模式，为了运用农业气象观测系统（这些观测可以为建立模式搜集必要的情报），还有许多事情要做。

本书的主要内容是，与水文气象环境条件对作物群体生产力影响过程的数学描述有关的诸问题。

本专著中还扼要地叙述了作者在近十年中在这一领域所获得的主要结果。在此期间，作者曾不止一次地同很多同事讨论过这些问题。这种接触促进了书中所叙述的概念的发展。故此，作者对“天气-产量-数学”讨论会的所有积极参加者，特别是其组织者——Ю. К. 罗斯表示感谢。

作者还对 А. П. 博伊科和 Е. В. 阿巴希娜 (А. П. Бойко и Е. В. Абашина) 的合作、对全苏农业气象科学研究所 (ВНИИСХМ) 数学模拟实验室全体同志的经常协作，表示衷心的感谢。

目 录

编者的序

引言

第一章 农业气象学中数学模拟的一般问题	1
1.1. 土壤-作物-大气系统是数学模拟的对象	1
1.1.1. 系统和外界环境的复杂性	4
1.1.2. 系统的非常定性	6
1.1.3. 系统的惯性	7
1.1.4. 系统的非线性性	8
1.1.5. 系统的适应性	9
1.2. 作物生产过程的数学模式分类	13
1.3. 建立农业生态系统模式的主要阶段	17
第二章 产量计算是数学物理学问题	21
2.1. 前提	21
2.2. 能量交换和物质交换 (生态学方程组)	23
2.3. 生长 (生物学方程组)	30
第三章 土壤-作物-大气系统的水热动力学	37
3.1. 课题的物理学和数学表达式	37
3.2. 数值实验的结果	43
3.2.1. 天气条件对植被水文气象状况的影响	45
3.2.2. 植被的密度和高度对其水文气象状况的影响	52
3.2.3. 植被的产量及其决定因子	63
第四章 农业群落生长的简化理论模式	68
4.1. 模式的结构	68

4.2. 农业群落植物量动态规律性的分析·····	72
第五章 农业气象学中的统计模式和物理-统计模式 ·····	80
5.1. 统计模式·····	80
5.2. 物理-统计模式·····	91
第六章 作物产量形成的动力模式 ·····	98
6.1. 建立动力模式时作物生理过程的计算·····	98
6.1.1. 光合作用和呼吸作用的模拟·····	99
6.1.2. 生长过程的模拟·····	103
6.1.3. 调节机理的模拟·····	108
6.2. 在产量形成模拟中能量和物质交换过程的参数化·····	111
6.3. 产量形成的现代动力模式分析·····	125
第七章 “天气-产量”的动力-统计模式 ·····	140
7.1. 群体植物量动态的模拟·····	140
7.2. 群体水分状况的模拟·····	150
7.3. 模式的证明和证实·····	155
7.4. 模式的应用·····	169
参考文献 ·····	175

第一章 农业气象学中数学模拟的一般问题

1.1. 土壤-作物-大气系统是数学模拟的对象

讨论农业气象学中的数学模拟问题，很自然地是从这样的问题开始的：在这一知识领域中模拟对象的特点是什么？农业气象学所研究的（即模拟的）基本对象是水文气象条件与作物之间的关系。众所周知，有机体与其周围环境间的相互关系是一个生态学研究课题。因此，农业气象学主要问题的范围，就其实质来说，是属于生态学问题的范围。所以，在以后的讨论中使用生态学所采用的一套概念是适当的。

生态系统(生态系)的概念是生态学最重要的概括。生态系统包括相互关联的生物有机体，和外界环境中对有机体影响最大的、且在一定程度上受有机体活动制约的那些因素的总和^[16]。“生态系统”概念常常被在涵义上与之相近的术语“生物地理群落”所代替。

应当指出，生态学研究中所采用的界限和生态系统的内容具有相对性，可以用于测定生态系统参数的数目是很大的，周围环境的参数的潜在数目也是很大的。因此，当从众多的关系中分离生态系统的时候，只能按照研究任务的需要挑选那些本质的关系。这种选择决定着生态系统的规模及其组成部分的数量。

最普通的农业生产生态系统(农业生态系)，是种植单一作物的农田，它比许多自然生态系统，诸如草地、森林或湖

泊简单得多。不过,即使是这样的生态系统也是非常复杂的。对它的研究远远超出农业气象学的任务之外。农业气象学,就其任务而言,一般只需注意农业生态系统的一个活的成分——植物群落(农业群落)就足够了。在外界环境的各种各样的因子中,也只能注意对植物与周围环境间热量、水分、二氧化碳和无机营养交换过程影响最大的那些因子(在个别情况下,例如在分析土壤过湿的后果时,还必须注意氧的交换)。

作物同时处于两个环境——近地面空气层和土壤之中,并与之发生积极的相互作用。作物用外界环境的无机化合物合成碳水化合物,和富含化学能的其他有机物质。能量和物质的吸收是在植物和物理环境的边界上通过“边界过程”实现的。譬如,太阳能和二氧化碳的同化发生在叶中,即在作物和大气的边界上;而水和矿物质的吸收则是通过根系和土壤的边界。发生在叶片中和根系里的环境与作物间的交换过程,就生理机能而言,是不可分割的,是同时发生的。作物内部复杂的转移过程保证了它们之间的关系。

在边界发生交换过程的同时,植物群落也改造其周围的空气和土壤环境,在一定程度上使外界条件的剧烈波动得到缓和。因此,地理环境又需划分为“外界”环境和“内部”环境(见图1)。外界环境因子不依赖于植物群落,且不是直接地而是通过内部环境作用于后者。相反,内部环境因子则直接地作用于并依赖于植物群落。

内部环境是农业生态系统的不可分割的组成部分。在内部的和外部的环境之间划出一个过渡缓冲带是适宜的。在缓冲带中不存在任何植物量的成分。但是,与外界环境不同的是,这个带的物理特征由于交换过程的结果而对农业群落保

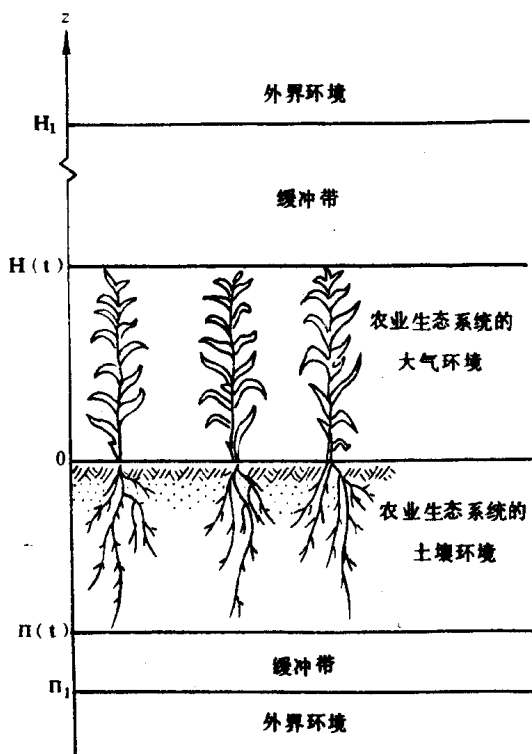


图 1 土壤-作物-大气系统的定义

持某种依赖关系。

总之，农业气象学中的数学模拟对象——“土壤-作物-大气”三个环节的系统是农业生态系统的组成部分。

土壤-作物-大气系统有如下特征：

- (1) 系统及其周围环境内部结构的复杂性；
- (2) 非常定性；